

# 基于模糊理论的船舶领域模型研究

江龙晖, 郑中义, 齐 乐

(大连海事大学航海学院, 辽宁大连 116026)

**摘 要:** 在分析船舶领域的模糊特性及其影响因素的基础上, 提出一种基于 AIS 数据和模糊理论的船舶领域模型建模方法。首先介绍从 AIS 数据中提取船舶会遇样本的方法, 引入模糊避让度概念, 并提出避让度隶属度函数的确定方法, 根据避让度及船舶最近会遇点分布情况确定船舶领域边界。最后应用实际数据对所提出的方法进行验证。结果表明: 该方法可以根据 AIS 数据确定水域的船舶领域。

**关键词:** 海上交通工程; 船舶领域; AIS 数据; 模糊理论

**中图分类号:** U675

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-2783(2017)19-2241-04

## Study on ship domain model based on the fuzzy theory

GANG Longhui, ZHENG Zhongyi, QI Le

(Navigation College of Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

**Abstract:** Based on the fuzzy characteristics of ship domain and its factors, a model development method was proposed in this study, which was based on the automatic identification systems (AIS) data and the fuzzy theory. The extraction of the samples of the vessel-encounter from AIS data was first introduced in this study. Meanwhile, the fuzzy degree of collision avoidance was introduced and the membership function of degree of collision avoidance was determined. In addition, the boundary of ship domain was determined on the basis of the degree of collision avoidance and the closet point of approach. The actual AIS data was used to verify the newly proposed method. The results showed that the method proposed was suitable for the determination of the ship domain based on the AIS data.

**Keywords:** marine traffic engineering; ship domain; AIS data; fuzzy theory

船舶领域的概念是由日本学者 Fujii 等<sup>[1]</sup> 1971 年提出的, 他将船舶领域定义为绝大多数后继船舶驾驶员避免进入前一艘在航船舶周围的领域。Fujii 通过对日本沿海水域进行多次观测和统计分析后, 确定了椭圆形的船舶领域模型。船舶领域模型提出后被迅速地应用于船舶避碰、船舶交通容量以及水上交通安全评价等研究中。20 世纪 70 年代 Fujii 等将船舶领域引入欧洲, 英国学者 Goodwin<sup>[2]</sup> 基于海上交通调查和雷达模拟器实验, 考虑国际避碰规则提出了由 3 个扇形组成的船舶领域模型, 其大小与船长、交通密度和海域类型有关。van der Tak 等<sup>[3]</sup> 结合 Fujii 和 Goodwin 模型建立了中心船位置左后偏移的椭圆形模型, 并给出了各种船舶领域大小的计算方法。Davis 等<sup>[4]</sup> 为方便计算和模拟对 Goodwin 模型边界进行平滑处理, 得出中心船位于圆心左后方的圆形船舶领域, 并使各扇形面积比例保持不变。赵劲松等<sup>[5]</sup> 应用模糊理论对 Goodwin 模型边界进行处理得出模糊船舶领域模型。毕修颖等<sup>[6]</sup> 基于船舶操纵性、水动力学和船舶避碰行为确定了船舶碰撞危险度, 进而给出了船舶领域模型计算方法。孙立成<sup>[7]</sup> 应用船舶避碰行为调查数据对 Fujii 和

Goodwin 模型进行修正, 得出能度不良和狭水道情况下的船舶领域模型。郭志新<sup>[8]</sup> 考虑驾驶员反应时间提出了交叉相遇和追越情况下的船舶领域。郑中义等<sup>[9]</sup> 提出船舶空间碰撞危险度概念, 并给出了不同空间碰撞危险度下的船舶领域范围。徐周华等<sup>[10]</sup> 考虑船舶操纵性能、航速、驾驶员反应时间和航行水域环境信息建立了狭窄水域船舶领域三维模型。Pietrzykowski 等<sup>[11-12]</sup> 应用模糊理论建立了八边形模糊船舶领域。Wang 等<sup>[13-14]</sup> 提出了模糊四元船舶领域模型。

船舶领域受多种因素影响, 如驾驶员特性、船舶特性及周围通航环境特性等, 传统的建模方法很难系统地对其进行描述和解析。船舶领域模型研究时首先需要获取建模数据, 常用方法包括驾驶员问卷调查法、海上交通调查、航海模拟器模拟操作法; 然后运用传统统计分析方法对所获取的主观和客观数据进行处理, 确定适用于特定水域的船舶领域模型。目前的研究成果大多局限于某些或某类特定因素, 如船速、船长等, 而对于驾驶员特性、船舶特性及周围通航环境特性等不确定因素考虑较少, 降低了船舶领域的准确性及其在通航实际应用中的适用性。

收稿日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509031); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132016009)

第一作者: 江龙晖(1979-), 女, 讲师, 主要研究方向为海上交通工程和船舶交通管理, ganglh@dlmu.edu.cn

通过问卷调查、海上交通调查或航海模拟器获取数据的方法费时费力,且数据具有一定的局限性、不准确性和不真实性,使船舶领域模型的研究和应用受到限制。随着船舶自动识别系统(automatic identification systems, AIS)强制安装和 AIS 岸基的不断完善,产生了大量的 AIS 数据,这些数据包含了较为全面的船舶航行静态和动态信息,为船舶领域研究提供了充足的数据支持。船舶航迹及运动信息本身就包含了人、环境和船舶本身对船舶行为的影响,根据 AIS 数据得到的船舶领域模型与实际更为相符、更具实用性。基于上述分析,本文提出一种应用 AIS 数据确定水域船舶领域模型的方法。

## 1 基于 AIS 数据的船舶会遇样本提取

AIS 数据中包含了较为全面的船舶航行的静态和动态信息,航速、真航向、对地航向、经度、纬度和 AIS 数据发送时间可以用于船舶领域的研究。MM-SI 可以用于识别船舶,航速和对地航向用于计算船舶运动参数,经度和纬度用于计算船舶位置信息,真航向用于判别船舶间会遇态势, AIS 数据发送时间和船舶位置信息可以确定船舶航迹等。

基于 AIS 数据提取船舶会遇样本的步骤如下:

- 1) 根据 AIS 数据解码<sup>[15-16]</sup>后的船舶时间信息和位置信息,寻找同一时间段内位于同一区域相近位置的船舶;
- 2) 对船舶运动数据进行差值分析,由于 AIS 获取的船舶运动信息是时间离散的,2 艘船的信息可能不在一个时间节点上,因此需要通过差值方法获取某时刻的船舶运动信息;
- 3) 根据船舶动态数据计算船舶间相对运动参数,主要包括航向夹角、相对速度、相对位置和距离、最近会遇距离、最近会遇时间等;
- 4) 依据避碰规则中对会遇态势的划分,根据船舶相对运动参数,提取可以用于船舶领域研究的船舶会遇样本。

## 2 基于模糊避让度的船舶领域模型

### 2.1 船舶领域的模糊性

由船舶领域的定义可知,船舶领域的范围是船舶驾驶员为了保证船舶航行安全,根据本船操纵特性和周围通航环境的具体情况确定的。此范围与船舶驾驶员的主观判断有关,船舶采取避让措施的位置可以近似看作是船舶领域的边界。船舶驾驶员采取避让行动的位置和时机与驾驶员的操船技能、水上资历及主观意识有关,难以量化描述,因此本文运用模糊理论对船舶避碰行为及船舶领域进行研究。

### 2.2 AIS 数据中船舶避让行为的识别

根据 AIS 数据解码后的船舶动态信息获取两船间位置的变化曲线,计算让路船与直航船间的初始

会遇点  $P_0$ 、会遇点与直航船之间相对方位、最近会遇距离等。

当初始会遇点没有变化时说明两船都没有进行转向避让,如图 1(a) 所示;当初始最近会遇点  $P_0$  与实际通过的最近会遇点  $P_1$  不同时说明船舶采取了避让措施,如图 1(b) 所示。

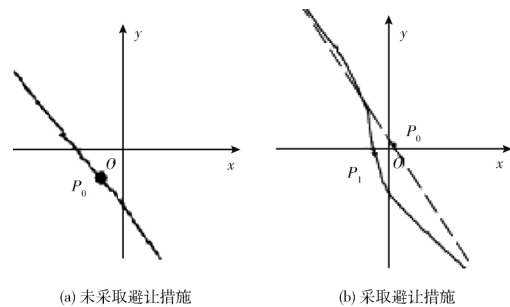


图1 避让行为识别示意

### 2.3 模糊避让度及隶属度函数的确定

船舶领域边界具有模糊性。为量化船舶领域的模糊边界,引入“避让度”概念。为了保证航行安全,船舶驾驶员会在本船周围设定一个安全区域。当两船均采取避让行动,则设定此安全区域的“避让度”为 1;若两船都未采取避让行动,则设定此区域的“避让度”为 0。在 0~1 之间,“避让度”的隶属度函数由避让次数所占会遇次数百分比来确定。

设初始最近会遇点  $A_0$  与直航船航向相对弦角为  $\theta$ ,最近会遇距离为  $d$ ,则满足  $\theta$  和条件  $d$  的会遇样本总数为  $N(d, \theta)$ ,其中采取了避让行动的次数为  $n(d, \theta)$ ,则避让度的隶属函数  $\mu(d, \theta)$  为

$$\mu(d, \theta) = \frac{n(d, \theta)}{N(d, \theta)} \quad (1)$$

式中  $N(d, \theta)$  和  $n(d, \theta)$  可根据船舶避让行为和最近会遇点的分布来确定。 $\mu$  可以根据以  $\theta$  角为中心的 1 个扇形内的最近会遇点分布数确定,如图 2 所示,黑点代表有船舶采取避让行动,白点代表两船都未采取避让行动。

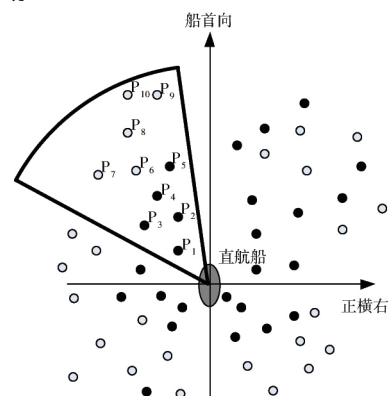


图2 避让度隶属度函数确定方法

计算  $\theta$  值时,按顺时针方向在扇形区域内读取第 1 个最近会遇点的弦角值  $\theta_i$ ,求取各点弦角与  $\theta_i$  点的

差值 $\Delta\theta_j$ 为

$$\Delta\theta_j = \begin{cases} \theta_i - \theta_j, & \theta_i \geq \theta_j \\ \theta_i - \theta_j + 2\pi, & \theta_i < \theta_j \end{cases} \quad (2)$$

已知 $\theta_j$ 和 $\Delta\theta_j$ 可计算得到 $\theta$ 为

$$\theta = \begin{cases} \theta_j + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta\theta_j}{m}, & \theta_j + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta\theta_j}{m} < 2\pi \\ \theta_j + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta\theta_j}{m} - 2\pi, & \theta_j + \frac{\sum_{j=1}^m \Delta\theta_j}{m} \geq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中 $m$ 为扇形面积内最近会遇点样本数。最近会遇点分布图上,以直航船为圆心确定一半径为2 n mile的扇形,假设扇形内有 $m$ 个最近会遇点 $P_i(d_i, \theta_i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ),  $d_i$ 为最近会遇距离,  $N(d, \theta)$ 和 $n(d, \theta)$ 与 $d_i$ 有关,设 $d_7 < d < d_8$ ,  $N(d, \theta)$ 为7,  $n(d, \theta)$ 为2,则 $\mu(d, \theta) = 2/7$ 。根据以上方法可得到不同 $d$ 和 $\theta$ 时的隶属度 $\mu$ 值。

#### 2.4 船舶领域边界的确定

$d$ 与 $\mu$ 值之间的关系非一一对应,每个 $d$ 对应

唯一的 $\mu$ ,但是 $\mu$ 对应的 $d$ 并不唯一。样本数量越多, $\mu$ 值越可靠,所以当1个 $\mu$ 对应多个 $d$ 时,选取样本数量最多的值。从实际意义上看,以本船为圆心,避让度 $\mu$ 对应的极坐标点 $B(d, \theta)$ 即为该避让度下船舶领域边界上的点,将所有 $B(d, \theta)$ 连接起来即可获得船舶领域的边界。 $B(d, \theta)$ 对应的平面坐标为

$$\begin{cases} x_0 = d \cdot \sin\theta \\ y_0 = d \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

### 3 实证研究

应用我国某水域的AIS数据对所提出的船舶领域研究方法进行验证。对AIS原始代码进行解码后,根据上述数据处理方法提取的会遇船舶样本数共计2 090个,剔除AIS消息中的船舶航行状态错误、航速大小错误等样本,最终得到的有效样本数量为1 045个,其中对遇样本290个,交叉样本500个,追越样本255个。将不同会遇态势下的让路船航线绘制于图3,所有样本的最近会遇点分布如图4所示。

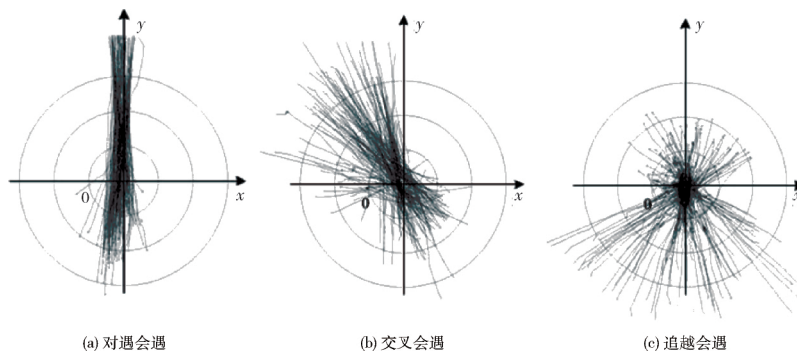


图3 不同会遇态势下的让路船航线

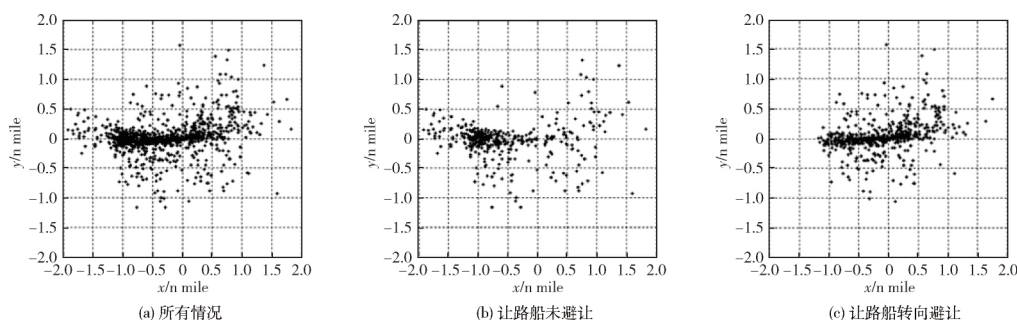


图4 会遇情况下的CPA分布图

图4(a)所有船舶会遇点的分布情况,图4(b)描述的是没有船舶采取避让措施时船舶会遇点的分布情况,图4(c)描述的是船舶采取避让措施时船舶会遇点的分布情况。从图4可以看出未采取避让措施的船舶会遇点比较分散,离坐标原点较远;采取避让措施的船舶会遇点分布较为集中,且靠近坐标原点;这种现象与航海实践中最近会遇距离越小碰撞危险度越高的实际情况相符合。

根据隶属度计算方法和船舶领域边界确定方法,根据1 045个样本进行计算,将所有 $B(d, \theta)$ 点依次连线,即可得到不同避让度 $\mu$ 水平下的船舶领域边界曲线, $\mu=0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时的船舶领域边界如图5所示。

由图5可以看出, $\mu$ 越大船舶领域的范围越小,当 $\mu=0.5$ 时,采取了避让措施和未采取避让措施的他船数目相等。将 $B$ 点连线得到的船舶领域边界是

一个不规则的形状,为了可以将其应用到避碰等领域,对该边界曲线进行拟合,如图6所示。

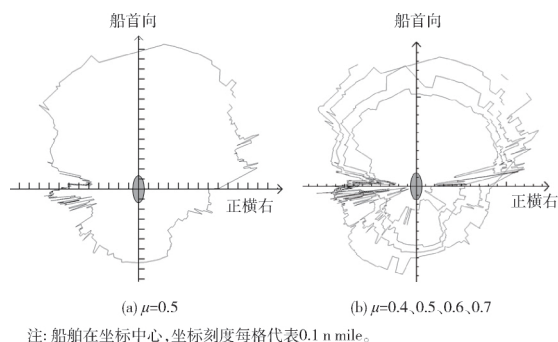


图5 不同避让度水平下船舶领域边界曲线

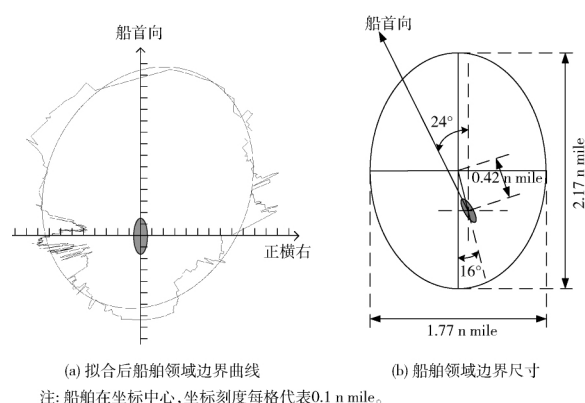


图6  $\mu=0.5$  时的船舶领域模型

拟合后得到椭圆形船舶领域,椭圆的长轴直径为 2.17 n mile,短轴直径 1.77 n mile,本船位置位于椭圆中心下方偏右  $16^\circ$ ,距原点 0.42 n mile 处,船首向为  $336^\circ$ 。

#### 4 结 论

本文提出了用于船舶领域模型研究的 AIS 数据处理方法,可从 AIS 数据中提取出船舶会遇数据。引入模糊避让度概念,并提出避让度隶属度函数的确定方法,根据避让度及船舶最近会遇点分布情况确定船舶领域边界。

根据实际 AIS 数据确定的船舶领域模型为椭圆形,当  $\mu=0.5$  时椭圆形船舶领域的长轴直径为 2.17 n mile,短轴直径为 1.77 n mile,本船位于椭圆中心下方偏右  $16^\circ$ ,距原点 0.42 n mile,船首向为  $336^\circ$ 。

#### [参考文献] (References)

- [1] FUJII Y, TANAKA K. Traffic capacity [J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4): 543-552.
- [2] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains [J]. Journal of Navigation, 1975, 28(3): 328-344.
- [3] van der TAK C V, SPAANS J A. A model for calculating a maritime risk criterion number [J]. Journal of Navigation, 1977, 30(2): 287-295.

- [4] DAVIS P V, DOVE M J, STOCKEL C T. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas [J]. Journal of Navigation, 1980, 33(2): 215-222.
- [5] 赵劲松, 王逢辰. 海上船舶互见中 DCPA 决策模拟模型[J]. 大连海运学院学报, 1991, 17(1): 29-36. ZHAO Jinsong, WANG Fengchen. A simulating model of DCPA decision making in good visibility of ships [J]. Journal of Dalian Marine College, 1991, 17(1): 29-36. (in Chinese)
- [6] 毕修颖, 贾传荧, 吴兆麟, 等. 船舶避碰行动领域模型的研究[J]. 大连海事大学学报, 2003, 29(1): 9-12. BI Xiuying, JIA Chuanying, WU Zhaolin, et al. Research on ship's domain for starting to avoid collision [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2003, 29(1): 9-12. (in Chinese)
- [7] 孙立成. 船舶避碰决策数学模型的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2000. SUN Licheng. The research on mathematic models of decision-making in ship collision avoidance [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2000. (in Chinese)
- [8] 郭志新. 船舶领域边界的量化分析[J]. 航海工程, 2001(S1): 63-64.
- [9] 郑中义, 吴兆麟. 船舶碰撞危险度的新模型[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(2): 1-5. ZHENG Zhongyi, WU Zhaolin. New model of collision risk between vessels [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2002, 28(2): 1-5. (in Chinese)
- [10] 徐周华, 牟军敏, 季永清. 内河水域船舶领域三维模型的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(3): 380-383. XU Zhouhua, MU Junmin, JI Yongqing. A study of 3D model of ship domain for inland waterway [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2004, 28(3): 380-383. (in Chinese)
- [11] PIETRZYKOWSKI Z. Ship's fuzzy domain-a criterion for navigational safety in narrow fairways [J]. Journal of Navigation, 2008, 61(3): 499-514.
- [12] PIETRZYKOWSKI Z, URIASZ J. The ship domain-a criterion of navigational safety assessment in an open sea area [J]. Journal of Navigation, 2009, 62(1): 93-108.
- [13] WANG Ning, MENG Xianhao, XU Qingyang, et al. A unified analytical framework for ship domains [J]. The Journal of Navigation, 2009, 62(4): 643-655.
- [14] WANG Ning. An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain [J]. Journal of Navigation, 2010, 63(4): 733-749.
- [15] 齐乐. 基于 AIS 数据的船舶领域研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012. QI Le. Ship domain research based on AIS data [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [16] 齐乐, 郑中义, 李国平. 互见中基于 AIS 数据的船舶领域[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(1): 48-50. QI Le, ZHENG Zhongyi, LI Guoping. AIS-data-based ship domain of ships in sight of one another [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(1): 48-50. (in Chinese)